



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ITHALO GABRIEL LIMA FERREIRA

ANÁLISE COMPARATIVA DE PREVISÕES DE CAPACIDADE DE  
CARGA EM ESTACAS ESCAVADAS E DO TIPO HÉLICE  
CONTINUA

São Luís – MA  
2024

ITHALO GABRIEL LIMA FERREIRA

ANÁLISE COMPARATIVA DE PREVISÕES DE CAPACIDADE DE  
CARGA EM ESTACAS ESCAVADAS E DO TIPO HÉLICE  
CONTINUA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso Engenharia Civil da Universidade Federal do Maranhão, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Dr. George Fernandes Azevedo

São Luís – MA  
2024

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Lima Ferreira, Ithalo Gabriel.

Análise comparativa de previsões de capacidade de cargas em estacas escavadas e do tipo hélice contínua / Ithalo Gabriel Lima Ferreira. - 2024.

19 f.

Orientador(a): George Fernandes Azevedo.

Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Maranhão, São Luís - Ma, 2024.

1. Capacidade de Carga. 2. Comparações Estatísticas.  
3. Banco de Dados. 4. Metodologia Semi-empírica. 5. .  
I. Azevedo, George Fernandes. II. Título.

Trabalho de conclusão de curso de autoria de Ithalo Gabriel Lima Ferreira, intitulado: Análise comparativa de previsões de capacidades de cargas em estacas escavadas e do tipo hélice contínua. Apresentado como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil, e 20 / 09 / 2024, definida e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

---

Dr. George Fernandes Azevedo

---

1º Examinador

---

2º Examinador

São Luís – MA  
2024

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Capacidades de cargas últimas do banco de dados (LOBO, 2005) e do Matlab (Estacas escavadas).....	6
Figura 2 – Gráfico de dispersão entre as capacidades de cargas últimas (estacas escavadas).....	6
Figura 3 – Erro percentual das capacidades de cargas últimas (Estacas escavadas).....	7
Figura 4 - Capacidades de cargas últimas do banco de dados (LOBO, 2005) e do Matlab (Estacas do tipo hélice contínua).....	8
Figura 5 - Gráfico de dispersão entre as capacidades de cargas últimas (Estacas do tipo hélice contínua).....	9
Figura 6 - Erro percentual das capacidades de cargas últimas (Estacas do tipo hélice contínua).....	9

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de correção.....	4
Tabela 2 - Coeficientes de atrito.....	4
Tabela 3 - Média dos erros percentuais. (Estacas escavadas).....	7
Tabela 4 – Raiz quadrada do erro médio. (Estacas escavadas).....	8
Tabela 5 – Média dos erros percentuais (estacas do tipo hélice contínua).....	10
Tabela 6 – Raiz quadrada do erro médio (estacas do tipo hélice contínua).....	10

## SUMÁRIO

1. Introdução.....	2
2. Metodologia.....	3
3. Resultados e discussões.....	5
3.1.Estacas escavadas.....	5
3.2.Estacas do tipo hélice continua.....	8
4. Conclusões.....	10
5. Referências .....	11

## Comparative analysis of load capacity predictions in bored and continuous helix piles.

### Análise comparativa de previsões de capacidades de cargas em estacas escavadas e do tipo hélice contínua.

Article Info:

Article history: Received 2024-01-01 / Accepted 2024-11-20 / Available online 2024-11-30

doi: 10.18540/jcecvlXissYppIDNUMBER



**Ithalo Gabriel; Lima Ferreira**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7174-8803>

Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, Brasil

E-mail: [ithalo.glf@gmail.com](mailto:ithalo.glf@gmail.com)

**George Fernandes; Azevedo**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2207-7282>

Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, Brasil

E-mail: : [gf.azevedo@ufma.br](mailto:gf.azevedo@ufma.br)

#### Abstract

The aim of this article is to carry out a deterministic and comparative analysis of SPT drilling data on two deep foundation elements: excavated pile and continuous auger. The information for this borehole was obtained from the database in Lobo (2005), which contains investigations of SPT tests on various deep piles, as well as borehole depth data, specification of soil types at all levels of the borehole, pile dimensions,  $N_{spt}$  for each meter drilled, as well as the load capacity of each foundation element already calculated. With this in mind, the semi-empirical methodology in Aoki-Velloso (1975) was used to determine the lateral, tip and total bearing capacity. With the two different load capacity data, the known one and the one calculated in this article, a comparative analysis was carried out using the statistical methods: Percentage error and square root of the mean error, in order to investigate the main differences between the methods and verify the accuracy of the semi-empirical methodology. The deterministic analysis was carried out by means of computer implementation, using programming language and matlab software. Both the statistical comparisons and the data compiled from the boreholes and SPT calculations were programmed and established in microsoft excel spreadsheets, respectively. The results obtained showed acceptable ultimate load capacities for the continuous auger piles, with a percentage error of 32.09% and an average square root of error of 615.36 kN, while for the excavated piles the respective results were 48.57% and 4127.43 kN.

**Key words:** Load capacity, statistical comparisons, database and semi-empirical methodology.

#### Resumo

O artigo em questão tem por objetivo uma análise determinística e comparativa de dados de sondagem SPT em dois elementos de fundação profunda: estaca escavada e hélice contínua. As informações desta sondagem foram obtidas no banco de dados presente em Lobo (2005), neste tem-se investigações de ensaios SPT em diversas estacas profundas, assim como dados profundidade de furo, especificação de tipos de solos em todos os níveis da perfuração, dimensões da estaca,  $N_{spt}$  de cada metro perfurado, assim como a capacidade de carga de cada elemento de fundação já calculados. Com isso, na forma determinística utilizou-se a metodologia semi-empírica presente em Aoki-Velloso (1975), para determinação da capacidade de carga lateral, de ponta e total de ruptura. Já com os dois dados distintos de capacidade de carga, o conhecido e o calculado neste artigo, foi



feita a análise comparativa utilizando os métodos estatísticos: Erro percentual e raiz quadrada do erro médio, com interesse de investigar as principais diferenças entre os métodos e verificar a acurácia da metodologia semi-empírica. A análise determinística foi realizada por meio da implementação computacional, através de linguagem de programação com uso do software matlab. Já, tanto as comparações estatísticas, quanto os dados compilados através das sondagens e cálculos SPT, foram programados e estabelecidos em planilhas do microsoft excel, respectivamente. Com os resultados obtidos, teve-se valores de capacidades de cargas últimas aceitáveis para as estacas do tipo hélice contínua, com dados de erro percentual de 32,09% e raiz quadrada do erro média de 615,36 kN, já para as estacas escavadas os resultados respectivos são de 48,57% e 4127,43 kN.

**Palavras chaves:** Capacidade de carga, comparações estatísticas, banco de dados e metodologia semi-empírica.

## 1. Introdução

Segundo Pedreira e Pacheco (2016), em uma edificação, a maior parte das cargas tem direção vertical, sendo direcionadas para o centro da Terra. Uma vez que as cargas definem os esforços que atuam em uma estrutura, o estudo destas solicitações é de essencial relevância para o dimensionamento de uma edificação. A fundação é, por definição, a estrutura com propósito de absorver as solicitações de cargas aplicadas a ela, transferindo-as, assim, para o solo (ABNT, 2019).

Conforme a NBR 6122 (ABNT, 2019), as fundações podem ser divididas em superficial, sendo aquela em que a carga é transmitida de forma predominante por pressões que se distribuem na base do elemento estrutural e que tem uma profundidade assentada inferior à duas vezes a sua menor dimensão, e profunda, a que transmite pela base, pela superfície lateral ou por combinação de ambas, as cargas para terreno, sendo que sua base ou ponta deve estar assentada a uma profundidade mínima de 3 metros, e maior que oito vezes sua menor dimensão em planta.

Em relação a fundações profundas, segundo Antunes e Tarozzo (1998) a estaca hélice contínua é um elemento de concreto moldado *in loco*, executado por meio de trado contínuo e injeção de concreto, sob pressão controlada, através da haste central do trado simultaneamente a sua retirada do terreno. Já a estaca escavada, sem lama bentonítica, é um tipo de fundação moldada *in loco*, com auxílio de perfuratrizes, trados helicoidais, trados manuais ou mecânicos, sendo que a utilização destes últimos citados, não é possível obter grandes profundidades (FALCONI, 1998). Por outro lado, de acordo com Rebello (2008), as estacas escavadas com lama bentonítica diferem pela sua execução, com um equipamento rotativo, anexo a um guindaste ou por outro sistema chamado de *clamshell*. Existem dois tipos de execuções, sendo fundações circulares e retangulares, tendo que a escavação desse tipo de elemento necessita de um fluido estabilizador, ou seja, a lama bentonítica.

Ainda de acordo com a NBR 6122 (ABNT, 2019), para se obterem os esforços nas fundações, deve-se considerar, além das cargas especificadas no projeto, o peso próprio dos elementos estruturais de fundação. Deve-se levar em conta, igualmente, as variações de tensões decorrentes da execução eventual de aterros, reaterros e escavações, bem como os diferentes carregamentos que atuam durante as fases de execução da obra. Incluem-se nestes carregamentos o atrito negativo e os esforços horizontais sobre fundações profundas decorrentes de sobrecargas assimétricas.

Em uma fundação, a capacidade de carregamento está interligada com as características do solo, sendo este examinado por metodologias teóricas e semi-empíricas (LOBO, 2005). Monteiro (2017) estabelece que no Brasil os ensaios *in situ* têm uma maior predominância em relação aos ensaios em laboratório, sendo estes pouco utilizados devido ao custo elevado, muitas vezes até sendo vistos como gastos desnecessários. Portanto, a utilização de métodos semi-empíricos para a previsão da capacidade de carga em fundações é de suma importância para uma maior confiabilidade no dimensionamento e otimização dos custos na execução.

As fórmulas teóricas nem sempre fornecem resultados adequados para previsão da capacidade de carga em estacas, por isso opta-se pelos métodos semi-empíricos, os quais são baseados em correlações empíricas com resultados de ensaios *in situ* e ajustados com provas de

carga (Cintra, 2010). Os métodos semi-empíricos baseiam-se nos resultados de laudos tipo CPT e SPT, sendo o SPT mais comumente praticado pela engenharia brasileira para investigações geotécnicas. Conforme Lopes (2017), isso faz com que métodos que utilizam o N<sub>spt</sub> para cálculo de capacidade de carga sejam amplamente difundidos, como o método de Aoki-Velloso (1975).

Para Neto (2002), o considerável grau de incerteza ainda existente na investigação geotécnica e no projeto e execução de fundações profundas eleva a importância de adotar medidas que venham a verificar e/ou direcionar os estudos geotécnicos de fundação. Estas incertezas têm grande influência da heterogeneidade e variabilidade do material, no qual é constituído o solo natural onde os elementos de fundação são instalados. No que diz respeito à fundação por estacas, as incertezas podem interferir diretamente em um aspecto essencial na execução do projeto, a qual seria a determinação da capacidade de carga da estaca, cabendo ao engenheiro geotécnico a resolução do problema que o envolve. Este aspecto, por sua vez, é frequentemente discutido no meio geotécnico, em função de sua importância na segurança e no custo global da fundação (SILVA, 2013).

Diante disso, o presente artigo tem como objetivo a comparação de capacidades de cargas de estacas escavadas e do tipo hélice contínua, obtidas através de um banco de dados presente em Lobo (2005), com capacidades de cargas calculadas pelo método semi-empírico de Aoki-Velloso (1975), tendo que os parâmetros utilizados para os cálculos foram obtidos também na referência citada acima. Todas essas análises, foram feitas para demonstrar a importância deste método para projeção e execução de obras civis, e também a praticidade de sua utilização no software Matlab.

## 2. Metodologia

Este trabalho consiste em uma análise conjunta de um banco de dados de capacidade de cargas para estacas, presente em Lobo (2005). Neste banco de dados encontram-se as cargas de ruptura obtidas a partir de provas de carga realizadas para diferentes tipos de estacas, sendo elas cravadas, pré-moldadas, cravadas metálicas, hélice contínua e estacas escavadas, além das informações sobre os valores de SPT e da estratigrafia do subsolo para cada estaca. O presente trabalho teve como objeto de estudo as estacas do tipo escavadas e hélice contínua que, pela referência utilizada, apresenta uma quantidade de 70 e 98 fundações, respectivamente. Porém, entre estas, tem-se diversas estacas repetidas e também com solos incompatíveis com a tabela de coeficientes de atrito, primordial para a utilização do método proposto. Buscando a viabilidade do processo, foram selecionadas 20 estacas de cada tipologia especificada. Os valores de prova de carga foram comparados com os resultados obtidos através do método semi-empírico descrito por Aoki-Velloso (1975), utilizando, como ferramenta de implementação, o software Matlab. Os passos metodológicos desenvolvidos no trabalho estão descritos a seguir:

- I. Análise dos ensaios SPT nas estacas do banco de dados: Neste primeiro momento foi verificado os tipos de solos, visando a compatibilidade com a tabela de coeficiente de atrito do método semi-empírico. A partir disso, foram escolhidas 20 estacas escavadas e 20 estacas tipo hélice contínua para análise;
- II. Organização das tabelas para comparação da capacidade de carga: Foram geradas tabelas para cada tipo de estaca estudada no software microsoft excel, a fim de ser preenchida com os resultados das capacidades de carga de cada caso analisado. Nestas tabelas constavam valores de carga lateral, ponta e total de ruptura de cada estaca, tanto em relação ao banco de dados já conhecido, quanto para a que seria calculada pelo método semi-empírico, bem como a numeração de cada estaca estudada, de acordo com a referência Lobo (2005);
- III. Cálculo da capacidade de carga: Com a organização da tabela e a escolha das estacas, foi calculada a capacidade de carga pelo método semi-empírico descrito em Aoki-Velloso (1975), descrita pela equação a seguir:

$$Q_u = \left(\frac{KN_p}{F_1}\right) \cdot A_p + U \sum_{i=1}^n \left(\frac{\alpha KN_l}{F_2}\right) \Delta L_i \quad (1)$$

Onde,  $A_p$  é a área de ponta [ $m^2$ ],  $K$  é o fator que transforma a resistência do CPT em SPT [Mpa], e  $\alpha$  é porcentagem da resistência de ponta que vai para a resistência lateral [%], ambos expressos na tabela 2,  $F_1$  e  $F_2$  são fatores de correção expressos na tabela 1,  $U$  é o perímetro do fuste da estaca [m],  $\Delta L_i$  é o comprimento de cada segmento homogêneo ao longo do fuste da estaca [m],  $N_p$  [ $kN/m^3$ ] é o índice de resistência à penetração na cota de apoio e  $N_l$  [ $kN/m^3$ ] é o índice de resistência à penetração média na camada do solo de espessura.

A equação foi programada no software matlab, onde os dados de entrada eram o diâmetro da estaca, o valor de  $F_1$  que depende do tipo da estaca, o  $N_{spt}$  em cada metro de profundidade, os coeficientes  $\alpha$  e  $K$  de cada tipo de solo e o comprimento de cada trecho homogêneo de solo. Todos esses valores foram definidos com base no banco de dados e em conjunto com as tabelas referentes de método Aoki-Velloso mostradas a seguir:

**Tabela 1 - Fatores de correção**

Tipo de Estaca	F1	F2
Franki	2,5	2F1
Metálica	1,75	2F1
Pré-Moldada	1+D/0,80	2F1
Escava	3	2F1
Raiz, Hélice contínua e ômega	2	2F1

Fonte: Adaptado (Aoki-Velloso, 1975).

**Tabela 2 - Coeficientes de atrito**

Solo	K(MPa)	$\alpha$ (%)
Areia	1	1,4
Areia Siltosa	0,8	2
Areia Siltoargilosa	0,7	2,4
Areia Argilosa	0,6	3
Areia Argilossiltosa	0,5	2,8
Silte	0,4	3
Silte Arenoso	0,55	2,2
Silte Arenoargiloso	0,45	2,8
Silte Argiloso	0,23	3,4
Silte Argiloarenoso	0,25	3
Argila	0,2	6
Argila Arenosa	0,35	2,4
Argila Arenossiltosa	0,3	2,8
Argila Siltosa	0,22	4
Argila Siltoarenosa	0,33	3

Fonte: Adaptado (Aoki-Velloso, 1975).

A partir dos cálculos de cada estaca, foi preenchida a tabela criada no microsoft Excel, com a capacidade de carga de cada fundação;

- IV. Análises estatísticas: com as tabelas de capacidades de cargas todas preenchidas, foram realizadas análises estatísticas em relação a cada parâmetro, ou seja a capacidade de carga lateral, de ponta e última de cada estaca, a fim de verificar as

variadas dispersões entre os resultados das capacidade de cargas e quais os principais fatores que influenciam tais alterações. Os métodos estatísticos utilizados foram:

- Erro percentual: O erro percentual, conhecido também como erro de porcentagem, é o erro relativo expresso em porcentagem. O erro relativo é calculado como o erro absoluto dividido pela magnitude do valor exato. Desta forma, para a comparação entre os resultados obtidos nas simulações realizadas no software matlab, utilizou-se a seguinte equação:

$$Erro\% = \left| \frac{(\underline{H}-H)}{H} \right| \cdot 100 \quad (2)$$

Onde,  $\underline{H}$  é o valor de  $Q_u$  calculado através das simulações no software matlab e  $H$  É o valor das provas de carga pesquisado no banco de dados;

- Raiz quadrada do erro médio: A raiz quadrada do erro médio avalia a diferença quadrática média entre os valores observados e estimados e é representada pela equação a seguir:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \underline{H}_i)^2}{n}} \quad (3)$$

Onde,  $\underline{H}_i$  é o valor  $i$  da  $Q$  analisado,  $H_i$  é o valor  $i$  da capacidade de carga observado no banco de dados e  $n$  é o número total de simulações realizadas;

A partir dos métodos estatísticos citados acima, foram comparadas as capacidades de cargas do banco de dados com as simuladas pelo método semi-empírico, utilizando como ferramenta de cálculo o software microsoft excel, onde nele foram criadas fórmulas que simulam as equações estatísticas. Tendo que os dados obtidos pelas métricas estatísticas foram tabulados.

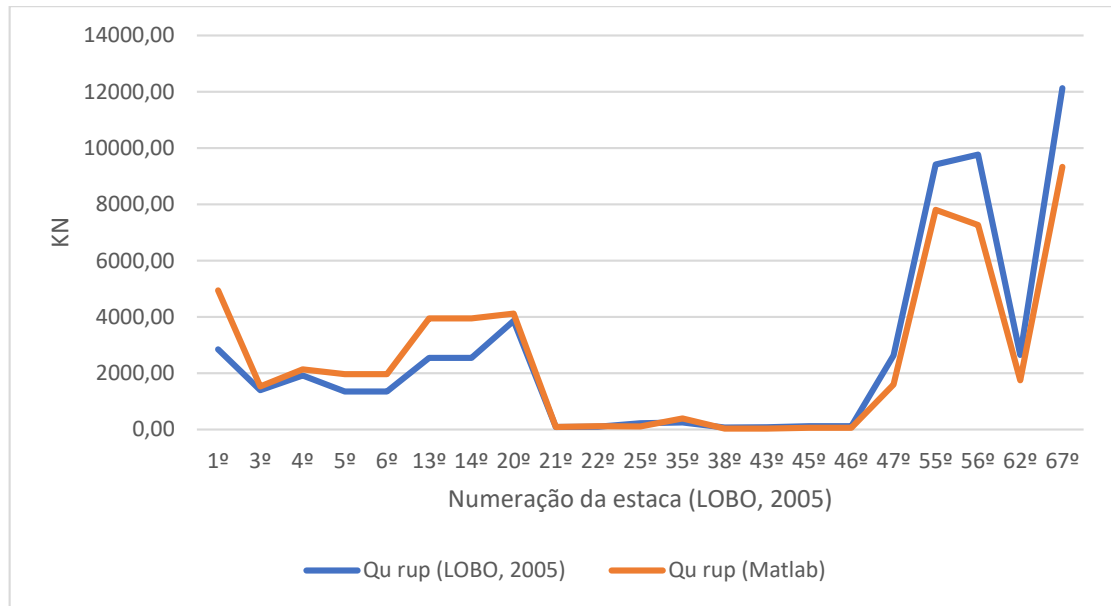
- V. Com todas as simulações estatísticas realizadas e com todos os resultados compilados e tabulados, foram criados gráficos que podiam representar os resultados de forma clara e coesa.
  - I. Por fim, com todos esses dados calculados e organizados em tabelas e gráficos, foi feito uma comparação também entre os dois tipos de estacas, a fim de observar qual apresentou menor erro em relação ao método aplicado e destacando estacas que mais se aproximam e também que se distanciaram em relação ao banco de dados.

### 3. Resultados e discussões

A partir das simulações realizadas no matlab, foi possível o conhecimento das capacidades de cargas últimas pelo método proposto. Com isso, foi feita a comparação dos resultados calculados com os pesquisados no banco de dados, para cada tipo de estaca.

#### 3.1. Estacas escavadas

Nas estacas escavadas notou-se um equilíbrio entre as variações dos resultados, tanto para mais quanto para menos, ou seja, o número de fundações com grandes variações se aproxima muito da quantidade de elementos que pouco diferiram entre os métodos, sendo melhor demonstrado na figura 1.

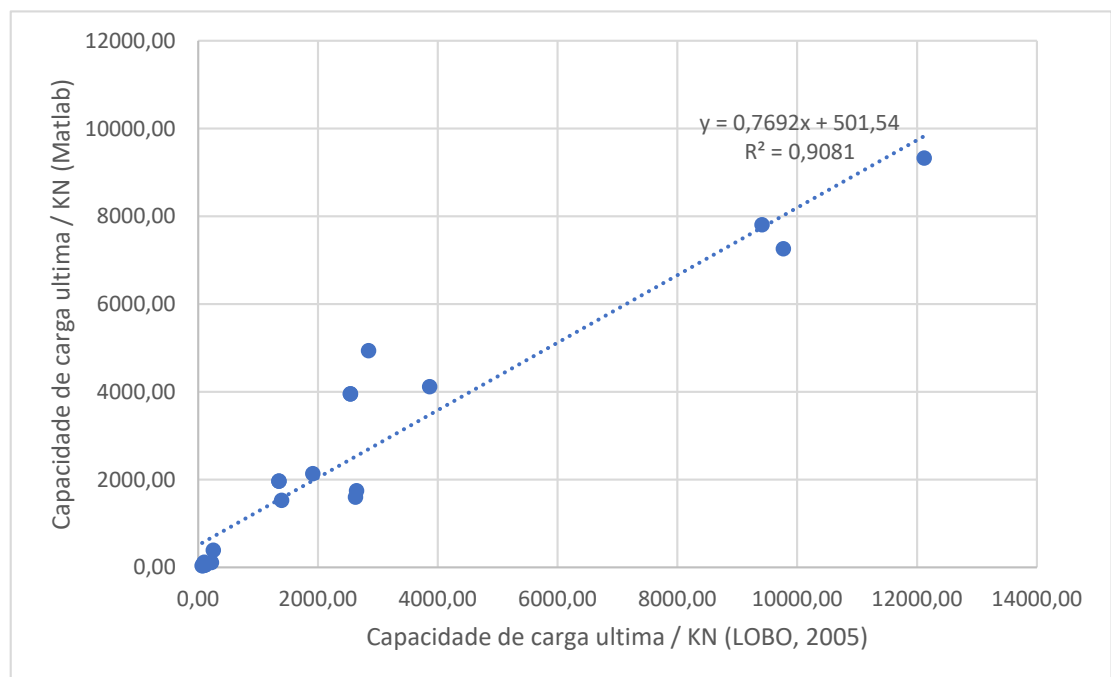


**Figura 1 – Capacidades de cargas últimas do banco de dados (LOBO, 2005) e do Matlab (Estacas escavadas).**

Verificou-se que entre a 1º e a 14º estaca uma maior variação entre os resultados, com exceção das estacas 3º e 4º. Já entre a 20º fundação até a 47º, pouco teve alterações, resultando quase em uma única linha no gráfico acima. Porém, no intervalo do elemento 55º até o 67º tornou-se às alterações entre os resultados.

Tem-se como destaques positivos as estacas de numeração 21º e 22º, que obtiveram diferenças modulares de apenas 1,43 kN e 17,96 kN, respectivamente. No entanto, para os destaques negativos, verificou-se as fundações da posição 56º e 67º, tendo diferenças modulares de 2507,70 kN e 2796,49 kN, respectivamente.

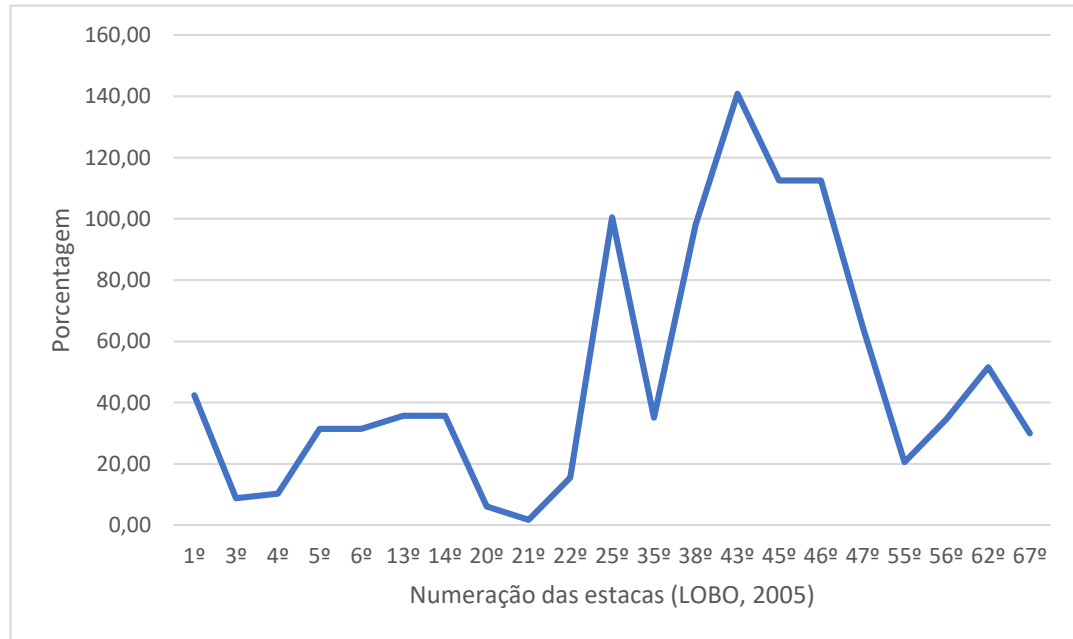
Já para uma análise quantitativa da correlação desses resultados, foi verificado a figura 2.



**Figura 2 – Gráfico de dispersão entre as capacidades de cargas últimas (Estacas escavadas).**

Observou-se uma correlação positiva dos dados, tendo os pontos em uma tendência crescente, outro aspecto dessa correlação também é observado na equação da reta na linha de tendência, onde  $R^2 = 0,90$ , ou seja, tendo valor bem próximo da correlação perfeita que seria  $R^2 = 1,0$ .

Já para calcular a diferença em porcentagem dos resultados do banco de dados e as simulações realizadas, utilizou-se o erro percentual, com os dados destes cálculos exibidos na figura 3.



**Figura 3 – Erro percentual das capacidades de cargas últimas (Estacas escavadas).**

Nota-se as diversas disparidades de resultados, obtendo assim porcentagens de erros próximos de 0% até as que ultrapassam os 100%. Deste modo, verificou-se que os maiores erros percentuais foram os da estaca 43º com 140,81% e os das fundações 45º e 46º, ambas com 112,54%. Por outro lado, os elementos que mais se destacaram positivamente foram a 20º e 21º, com erros de 6,11% e 1,70%, respectivamente.

Também é relevante a grande influência que a carga de ponta teve nos resultados de cargas últimas, visto que ela foi quem mais distanciou dos dados previstos. Com isso, tabelou-se as médias desses erros nos três tipos de capacidade de carga, destacando assim a preponderância da carga de ponta, tendo esta uma média de quase 70% de erro percentual, enquanto a carga lateral não ultrapassou os 36%. Com todos esses dados exibidos na tabela 3.

**Tabela 3 - Média dos erros percentuais. (Estacas escavadas)**

Ql rup / %	Qp rup / %	Qu rup / %
35,11	68,54	48,57

É importante ressaltar a diferença da análise dos resultados da figura 1 para a figura 3, visto que enquanto a primeira foi verificada a diferença quantitativa dos resultados, qual mais se distanciou e qual mais se aproximou numericamente, a terceira foi feita uma análise percentual dos dados, ou seja, não necessariamente a estaca que teve o maior valor na primeira observação teria também o maior erro percentual, tendo em vista que o pensamento contrário também é recíproco.

Desse modo, a última métrica estatística analisada foi a raiz quadrada do erro médio, observando assim a diferença quadrática média entre os dois métodos, com os resultados dos três parâmetros de capacidade de carga, exibidos na tabela 4.

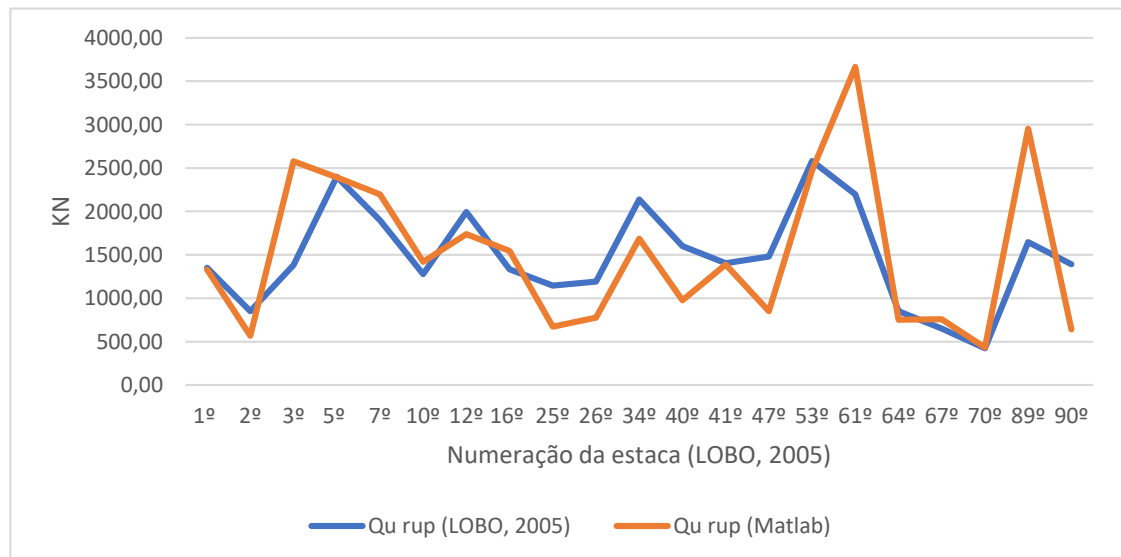
**Tabela 4 – Raiz quadrada do erro médio. (Estacas escavadas)**

<b>Ql rup / kN</b>	<b>Qp rup / Kn</b>	<b>Qu rup / kN</b>
320,71	1244,59	1179,97

Portanto, entende-se que a carga lateral foi a que teve os resultados mais aproximados nas simulações, tendo em média um erro menor que 300,00 kN, enquanto a carga de ponta foi o fator de principal influência, tendo em média um erro superior à 1200,00 kN, obtendo assim uma média de erro para a capacidade de carga última excedente à 1100,00 kN.

### 3.2. Estacas do tipo hélice contínua

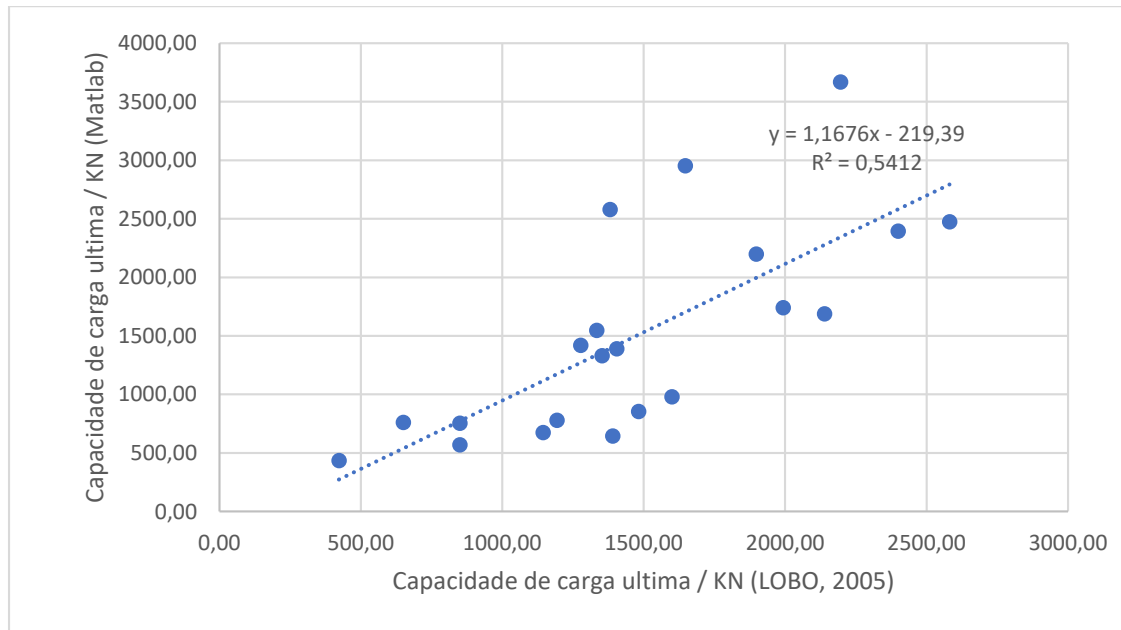
Para as estacas dos tipos hélices contínuas, na figura 4, visualmente observa-se que os traçados do gráfico apresentam significativas dispersões de resultados. No entanto, quantitativamente, percebe-se que o mesmo apresenta características semelhantes à análise anterior, ou seja, a quantidade de fundações com grandes flutuações de dados se aproximam da quantidade daquelas que pouco mudaram. Contudo, nota-se que a grande particularidade da figura 4, é a alternância dos dados, isto é, os resultados com diferenças positivas e negativas estão claramente espalhados ao longo das estacas analisadas.



**Figura 4 - Capacidades de cargas últimas do banco de dados (LOBO, 2005) e do Matlab (Estacas do tipo hélice contínua).**

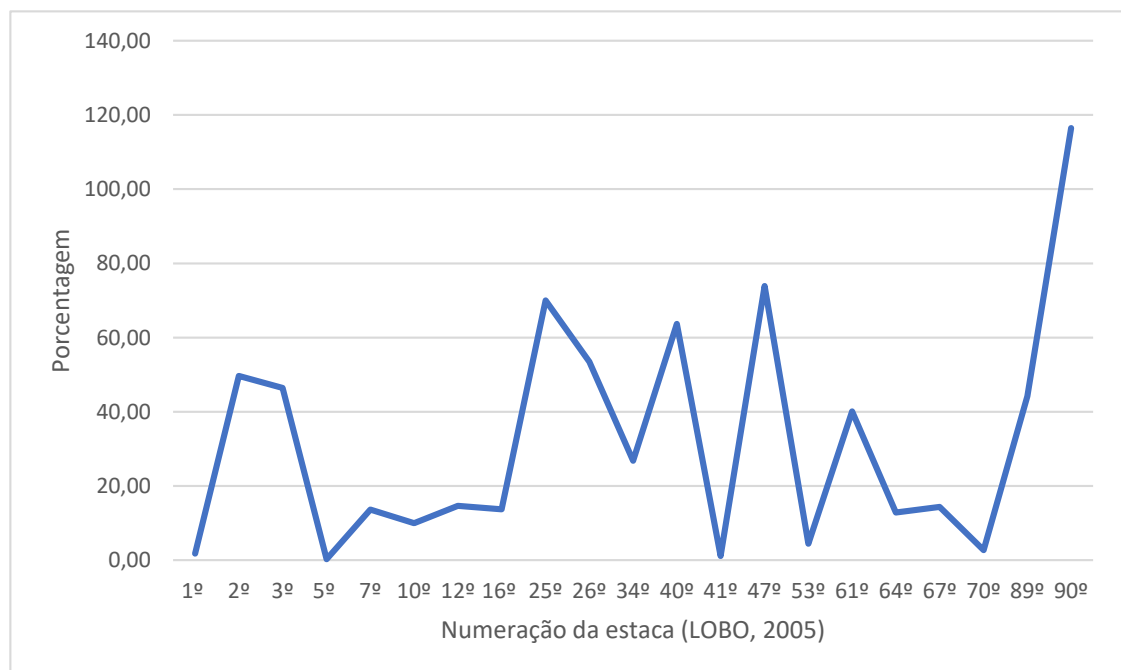
Partindo para uma análise numérica da Figura 4, observa-se como destaques positivos, as estacas de número 5 e 70, que apresentaram diferenças modulares de apenas 6,11 kN e 11,72 kN, respectivamente. Por outro lado, tem-se como tendências opostas os elementos de fundação número 61 e 89, obtendo assim as duas maiores diferenças modulares entre esses dados, sendo elas respectivamente de 1471,01 kN e 1304,14 kN.

Já para uma verificação quantitativa da correlação desses dados, foi estudada a figura 5.



**Figura 5 - Gráfico de dispersão entre as capacidades de cargas últimas (Estacas do tipo hélice contínua).**

Nota-se uma correlação mediana, quase fraca, tendo uma dispersão significativa dos pontos em relação a linha de tendência. No entanto, a tendência é positiva, evidenciando o crescimento da mesma, ou seja, os dados de cada método tendem a serem diretamente proporcionais. Ainda assim, a maior indicação dessa média correlação é a verificação do  $R^2 = 0,54$ , indicando assim apenas 54% de correspondência entre os métodos, significadamente distante da estaca anterior e do valor perfeito que seria 100%. Seguindo para o erro percentual, este encontra-se expresso pela figura 6.



**Figura 6 - Erro percentual das capacidades de cargas últimas (Estacas do tipo hélice contínua).**

Assim como no tipo de fundação anterior, percebe-se consideráveis divergências de erros, com resultados próximos de 0% até os que excedem os 100%. Com isso, foi apurado que as estacas



com os menores erros são as 5° e 41°, com valores de 0,26% e 1,09%, respectivamente. Já para os erros mais evidentes, destaca-se os elementos 47° e 90°, com valores de 73,89% e 116,45%, respectivamente.

Atenta-se que neste caso, a 5° estaca teve a menor diferença entre os métodos e também o menor erro percentual. Todavia, como explicado anteriormente, esse aspecto não passa de uma coincidência, tendo em vista que nos demais casos não se repetem esse detalhe, confirmando assim a particularidade de cada análise.

Continuando o estudo do erro percentual médio, representa-se, na tabela 5, a média dos erros de cada parâmetro da capacidade de carga.

**Tabela 5 – Média dos erros percentuais (Estacas do tipo hélice contínua).**

<b>Ql rup / %</b>	<b>Qp rup / %</b>	<b>Qu rup / %</b>
31,66	59,53	32,09

Nota-se, assim como na fundação anterior, que a carga de ponta tem erro percentual maior que os demais parâmetros de capacidade de carga, tendo ela um erro de 59,53%, enquanto as cargas laterais e últimas, obtiveram erros de 31,66% e 32,09%, respectivamente.

Por fim, analisa-se a raiz quadrada do erro médio como a última dado estatístico, que é exibido na tabela 6.

**Tabela 6 – Raiz quadrada do erro médio (Estacas do tipo hélice contínua).**

<b>Ql rup / kN</b>	<b>Qp rup / kN</b>	<b>Qu rup /kN</b>
176,34	621,24	615,36

Novamente, como na averiguação da estaca escavada, observa-se a grande influência da carga de ponta, tendo em vista o significativo resultado em relação à carga lateral. Sendo assim, tem-se que, em média, as cargas laterais das simulações tem erro de aproximadamente 176,34 kN, enquanto as cargas de ponta e última, cometem erros aproximados de 621,24 kN e 615,36 kN, respectivamente, com esses erros em relação às capacidades de cargas pelos corpos de prova.

#### 4. Conclusão

Com os resultados alcançados e comparados ao longo do presente artigo, observou-se duas interpretações, sendo uma a relação numérica da diferença entre os métodos e a outra uma associação percentual entre as capacidades de cargas. Em suma, a estaca que obteve os resultados mais satisfatórios, das simulações em conferência ao banco de dados, foi a do tipo hélice contínua, com erro percentual médio de 32,09% e raiz quadrada do erro médio de 615,36 kN, enquanto que para a estaca escavada, os mesmo dados, respectivamente, são de 48,57% e 1179,97 kN, referindo-se essas informações em relação a capacidade de carga última.

Pode-se detectar diversos fatores que possam ter influenciado essa pesquisa, a engenharia geotécnica já vem discutindo a dificuldade na determinação da capacidade de carga, Alonso (2010) e Lobo (2005) citam como exemplo, dentre outros fatores determinantes para esse problema, a necessidade do conhecimento das propriedades dos solos para que se possa atribuir de forma mais precisa parâmetros adequados em cada camada de solo, tendo em vista que a capacidade de carga de uma fundação é diretamente dependente da tipografia dos solos que a envolvem. Com isso, provavelmente a maior influência entre os resultados deste artigo se deu por essa particularidade: a escassez de um estudo detalhado dos solos fez com que os parâmetros impostos a ele fossem dados a partir de correlações já existentes, podendo ter gerado assim grandes alterações nas simulações realizadas. Associado a isto, tem-se a incerteza da aplicação de modelos matemáticos que simulam a capacidade de carga, em função das simplificações impostas para o equacionamento do problema.

O presente artigo tem como um dos objetivos a comparação do método semi-empírico descrito em Aoki-Velloso (1975) com os resultados de prova de carga, sendo o método avaliado em

diversas condições. Tendo em vista a dificuldade imposta pela ausência de conhecimentos mais aprofundados dos solos de assentamento de cada estaca, pode-se afirmar a acurácia do método estudado, tendo essa conclusão limitada às condições aqui citadas.

Por fim, em trabalhos futuros, torna-se interessante a avaliação deste e de demais metodologias semi-empíricas com uma análise preliminar minuciosa da estratigrafia de cada solo, podendo assim gerar, através de ensaios, características mais confiáveis do assentamento de cada estaca, concebendo, assim, parâmetros de solos com maior acurácia e, conseqüentemente, poder determinar com, com menor incerteza, a viabilidade do método.

## Referências

- A CPT-based model to predict the installation torque of helical piles in sand G Spagnoli - Marine georesources & geotechnology, 2017 - Taylor & Francis.
- Albiero, José Henrique; Cintra, José Carlos A. Análise e Projeto de Fundações Profundas: Tubulões e Caixões. In Hachich et al. (eds.). Fundação: Teoria e Prática. São Paulo: Ed. Pini Ltda. 1996, Cap.8.2, p.302-327.
- Alonso, Urbano Rodriguez. Exercícios De Fundações. 2a ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA, 2010.
- Analysis and design methods of helical piles: a critical review with emphasis on finite element method A Debnath, VP Singh - Arabian Journal of Geosciences, 2022 – Springer.
- Andrade, Alysso Rodrigo. Caracterização dos Elementos de Fundações Aplicáveis em Edificações na região de Florianópolis. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Florianópolis, p. 284. 2003.
- Antunes, William Roberto; TAROZZO, Hélvio. Execução de Fundações Profundas. In Hachich et al. (eds.). Fundação: Teoria e Prática. São Paulo: Ed. Pini Ltda. 1998.
- Aoki, N.; Velloso, D. A. An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. In: panamerican conference on soil mechanics and foundations engineering, 5., 1975, Buenos Aires. Buenos Aires, 1975.
- Associação brasileira de normas técnicas. NBR 6122: Projetos e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2019.
- Aviz, Luciana Barros de Miranda. Estimativa da capacidade de carga de estacas por métodos semi-empíricos e teóricos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, p. 133. 2006.
- Cintra, José Carlos Angelo; AOKI, Nelson. Fundações por estacas: projeto geotécnico. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- Falconi, F. Et al. Fundações: teoria e prática. – 2. Ed. – São Paulo: Pini, 1998.
- Helical piles: a practical guide to design and installation HA Perko - 2009 - [books.google.com](https://books.google.com)
- Investigating the performance of continuous helical displacement piles J Jeffrey - 2012 - [discovery.dundee.ac.uk](https://discovery.dundee.ac.uk)
- Lobo, Bianca Oliveira. Método de previsão de capacidade de carga de estacas: Aplicação dos Conceitos de Energia do Ensaio SPT. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia. Porto Alegre. 2005.
- Lopes, L. M. P. C. (2017). Projeto das Fundações de um Edifício Considerando a Probabilidade De Ruptura. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.
- Maia, Clovis M. Execução de Fundações Profundas. In HACHICH et al. (eds.). Fundação: Teoria e Prática. São Paulo: Ed. Pini Ltda. 1998, Cap.9, p.329-408.
- Monteiro, Tiago Melo. Análise de métodos semi-empíricos nacionais e internacionais para

- Determinação da capacidade de carga axial em estacas tipo raiz. Tecnologia, Fortaleza, v. 38, n. 2. 2017.
- Naval facilities engineering comand – NAVFAC. Foundations and Earth Structures: Design Manual 7.02. NAVFAC Publications Transmittal, Alexandria/VA (Estados Unidos), 1986.
- Neto, Luiz Russo. Avaliação de desempenho de fundações profundas. Anais, Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul – GEOSUL, Rio Grande do Sul, Pag. 153, 2002.
- Pedreira, Laedson Silva; PACHECO, Thiago Mendonça. Programa para cálculo de capacidade De carga e dimensionamento estrutural de estacas. Universidade Estadual de Feira de Santana, 2016.
- Predicting capacity of helical screw piles in Alberta soilsDJY Zhang - 1999 - [era.library.ualberta.ca](http://era.library.ualberta.ca)
- Rebello, Yopanan C. P. Et al. Fundações: Guia Prático de Projeto, Execução e Dimensionamento. São Paulo: Zigurate, 2008. 240 p.
- Silva, Leonardo Inácio. Avaliação dos métodos de previsão e controle de capacidade de carga em Estacas tipo perfil metálico “H”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa De Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Centro Tecnologia e Geociências. Recife, p.218. 2013.
- Teixeira, Alberto Henrique; GODOY, Nelson Silveira de. Análise, Projeto e Execução de Fundações Rasas. In HACHICH et al. (eds.). Fundação: Teoria e Prática. São Paulo: Ed. Pini Ltda. 1998, Cap.7, p.227-264.
- Soares, Juliana da Rocha. Estimativa Da Capacidade De Carga De Estacas Escavadas De Concreto A Partir De Métodos Semiempirícos E De Ensaio De Prova De Carga Estática. Congresso Brasileiro do Concreto, Natal, 56o, p.16, out. 2014.
- Velloso, Dirceu de Alencar; LOPES, Francisco de Rezende. Fundações: Critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.